

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ AL – CU – MG ВО ВРЕМЯ ГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ

Хомутов М.Г.

НИТУ «МИСиС», г. Москва

khomutov@misis.ru

В ходе выполнения данной работы разработана математическая модель, позволяющая определять напряжение течения алюминиевых сплавов, что, в свою очередь, позволяет в значительной мере упростить разработку новых или усовершенствование уже используемых в промышленности деформируемых алюминиевых сплавов. С целью получения качественных и количественных зависимостей напряжения течения от параметров термдеформационной обработки для сплавов системы Al – Cu – Mg; построены и проанализированы математические модели связи структурных характеристик и напряжения течения с составом и условиями термдеформационного воздействия, а также определены константы в известных уравнениях взаимосвязи напряжения течения с температурно-скоростными параметрами горячей деформации.

Повышение прочности алюминиевых сплавов в широком интервале температур позволит увеличить срок службы изделий конструкции самолетов, подверженных длительному тепловому воздействию.

В работе будут решены следующие задачи:

- Определение количественных связей влияния основных легирующих элементов и температурно-скоростных параметров деформации на деформационное упрочнение алюминиевых сплавов при повышенных температурах;

- Построение моделей связи структурных характеристик с напряжением течения.

Для разработки математической модели связи напряжения течения термдеформационной обработки при повышенных температурах использовали лабораторные образцы многокомпонентных сплавов системы Al – Cu – Mg – X, составы которых приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Составы лабораторных образцов сплавов системы
Al – Cu – Mg – X.

Сплав	Содержание легирующего элемента, % (масс.)						
	Cu	Mg	Fe	Ni	Sc	Zr	Al
1	2,3	1,0	1,3	0,9	-	-	ост.
2	2,3	1,4	1,3	0,9	0,2	0,1	ост.
3	2,7	1,5	1,2	1,4	-	-	ост.

Образцы сплавов системы Al – Cu – Mg – X, отожженные в течение 4 ч при 500 °С (для сплава 2 была проведена предварительная термообработка при 300 °С в течение 2 ч), подвергали деформации сжатием при разных скоростях и температурах деформации. Были выбраны следующие скорости и температуры: 0,01 с⁻¹, 0,1 с⁻¹, 1 с⁻¹, 10 с⁻¹, 350 °С, 400 °С, 450 °С, 500 °С.

Для моделирования напряжения течения при горячей деформации металлических материалов обычно применяют следующие уравнения [1 - 5]:

$$\dot{\varepsilon} = A' \sigma^{n'} \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right), \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon} = A'' \exp(\beta\sigma) \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right), \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon} = A(\sinh \alpha\sigma)^n \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right), \quad (3)$$

где A, A', A'', n, n', α, β – константы,

Q – энергия активации деформации, Дж/моль;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);

σ – напряжение течения, МПа;

$\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации, с⁻¹.

Степенной (1) и экспоненциальный (2) законы не соответствуют действительности при высоких и низких напряжениях соответственно, тогда как уравнение (3) является более общей формой, пригодной для широких диапазонов напряжения.

Во всех уравнениях температурная зависимость напряжения течения подчиняется уравнению Аррениуса, так как процессы динамического возврата и рекристаллизации в основном определяются диффузионным перемещением дефектов кристаллического строения. При этом энергия активации деформации (Q) по своему значению должна быть близка к энергии активации диффузии (самодиффузии).

На рисунке 1 приведены примеры кривых текучести сплава 2 при разных скоростях деформации и разных температурах деформации, а на рисунке 2 приведено сопоставление расчетных и экспериментальных значений напряжения течения для этого сплава.

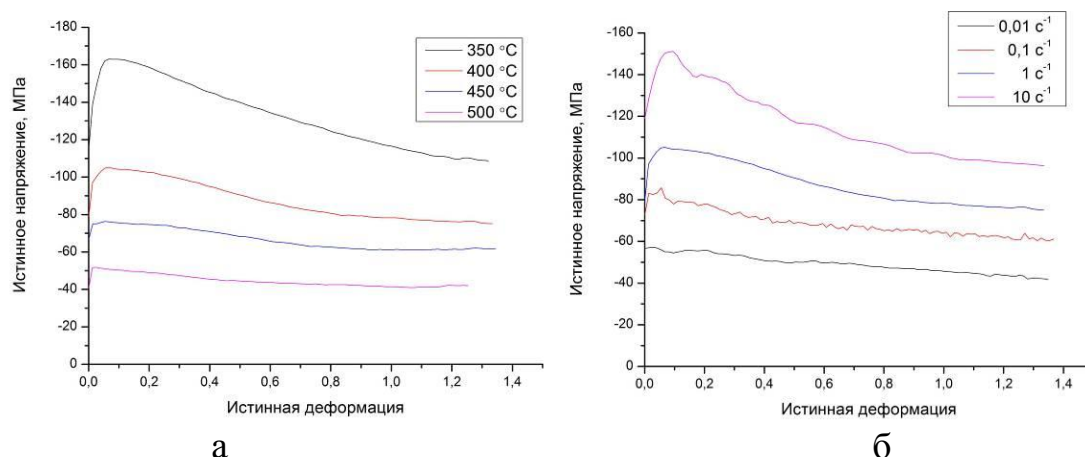


Рис. 1– Кривые текучести сплава 2:
а – скорость деформации 1 с^{-1} ;
б – температура деформации $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

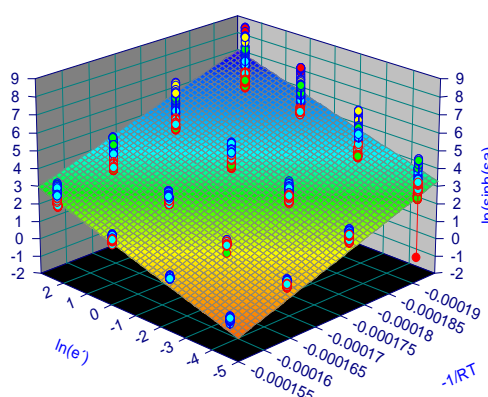


Рис. 2 - Сопоставление расчетных и экспериментальных данных для сплава 2.

Проведенный расчет позволяет определить неизвестные коэффициенты в уравнении (3) для сплавов системы Al – Cu – Mg – X. Тогда математическая модель для определения напряжения течения сплавов системы Al – Cu – Mg – X (в диапазоне концентраций: 2,3 – 2,7 % Cu, 1,0 – 1,5 % Mg, 1,2 – 1,3 % Fe, 0,9 – 1,4 % Ni, 0 – 0,2 % Sc, 0 – 0,1 % Zr), деформируемых в интервале температур 350 – 500 °C и скоростей деформации $0,01 - 10 \text{ с}^{-1}$ будет иметь вид преобразованного уравнения 3:

$$\sigma = \frac{0,45 \sqrt{a \sinh \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{A} e^{\frac{218330}{RT}} \right)}}{0,05}, \quad (4)$$

где σ – напряжение течения, МПа;

$\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации, с^{-1} ;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);

T – температура деформации, К;

Константа материала A зависит от объёмной доли фаз Al_9FeNi и $Al_3(Sc,Zr)$ по уравнению:

$$A = e^{0.36f_{Al_9FeNi} + 0.29f_{Al_3(Sc,Zr)} + 22.8}, \quad (5)$$

где f_{Al_9FeNi} и $f_{Al_3(Sc,Zr)}$ - объёмная доля фаз Al_9FeNi и $Al_3(Sc,Zr)$ соответственно, %.

Отклонение экспериментальных значений в сравнении с расчетными по данной модели не превышает 9,8 %, что находится в рамках среднестатистической ошибки при определении механических свойств металлических материалов при проведении стандартных испытаний на растяжение или сжатие.

Применение данной модели позволит упростить разработку новых сплавов на базе системы $Al - Cu - Mg - X$ или же улучшить комплекс механических свойств уже используемых алюминиевых сплавов, такого, например, как АК4-1. Разработанная в работе математическая модель связи напряжения течения с температурно-скоростными параметрами горячей деформации поможет оценочно установить наилучшие технологические режимы обработки алюминиевых сплавов для достижения заданного уровня свойств.

Вывод

В данной работе была разработана математическая модель для расчёта напряжения течения сплавов системы $Al - Cu - Mg - X$ в зависимости от параметров термомеханической обработки. Ошибка расчета составила 9,8%.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Hui Zhang, Luoxing Li, Deng Yuan и др. Hot deformation behavior of the new $Al-Mg-Si-Cu$ aluminum alloy during compression at elevated temperatures//Materials Characterization – 2007. №58.
2. Xiao Yan Liu, Qing Lin Pan, Yun Bin He и др. Flow behavior and microstructural evolution of $Al-Cu-Mg-Ag$ alloy during hot compression deformation//Materials Science and Engineering – 2009. №A500.
3. Бернштейн М.Л. Структура деформированных металлов. – М.: Металлургия, 1977.
4. Hugh J. McQueen, Stefano Spigarelli, Michael E. Rfssner, Enrico Evangelista. Hot Deformation and Processing of Aluminium Alloys.- CRC Press, 2011.
5. John H. BEYNON and C. Michael SELLARS, Modelling Microstructure and Its Effects during Multipass Hot Rolling, ISIJ International, Vol. 32 (1992). No, 3, pp. 359-367.